第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

1973—2020年甘肃河东夏半年降水变化特征及影响因素分析

曹彦超, 焦美玲, 秦 拓, 郭 桐

（庆阳市气象局，甘肃 庆阳 745000）

摘 要：基于1973—2020年4—9月甘肃河东60个国家气象观测站的降水资料，采用经验正交函数分解、相关分析等方法，分析了不同量级降水的时空分布及变化特征，并讨论了气温、大尺度环流、地形等对夏季降水的影响。结果表明：(1) 河东西部位于季风区最末端，气温变化对降水影响相对显著。其中甘南高原及以北山区海拔高度高，输入性水汽少，气候变暖对水循环的促进使降水量趋于增多。西部其他区域输入性水汽仍占主导地位，冷空气活动减弱使降水量趋于减少。(2) 河东东部地形过渡平缓，降水受季风影响显著。1998年后Niño 3.4区（5°N~5°S、120°~170°W）海温转为负距平为主，随着季风增强及雨带北抬，降水量随之增长。(3) 河东地区降水量年际变化的主要特征是所有站点同时增大或减小，但在拉尼娜年更容易出现东、西部降水反相变化的特征，太平洋年代际振荡负相位时西部地区降水增多，东部部分站点减少，北极涛动负相位时，东南部降水增多，西部部分站点减少。甘肃河东夏半年降水变化及影响分析，不仅为复杂地形下大气环流和气候变暖对降水变化影响的差异性研究提供参考，还将丰富季风区末端降水预测依据。

关 键 词：夏半年降水；时空变化；气温；环流指数；甘肃河东
文章编号：1000-6060(2022)06-1695-12(1695~1706)

政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告指出，在全球气候变暖情况下，极端湿润和极端干旱事件的严重程度会增加，但大气环流模态的变化会影响极端事件发生的地点和频率[1]。甘肃河东地区位于东亚季风影响区域末端，对季风的变化非常敏感[2]。受大尺度环流调整和气温升高双重影响，其夏半年降水量时空分布特征将出现怎样的变化，这是一个值得讨论的问题。于淑秋等[3]指出，我国西北地区气候在1986年前后发生了一次明显的跃变，跃变后年降水量增加了5.2%，夏季降水量增加了6.8%。王澄海等[4]认为1961—2018年西北地区92%的站点年降水量呈现增加趋势，少数呈下降趋势的站点集中在受季风影响较多的西北地区东南部。但也有研究表明，近50 a来我国西北地区东部不同量级的降水都在减少，降水日数变化是降水量减少的主要原因[5]，其中甘肃中部、南部、东部地区的下降率分别为$-0.82\ mm\cdot a^{-1}$、$-0.81\ mm\cdot a^{-1}$、$-0.93\ mm\cdot a^{-1}$[6]，除冬季轻微增加外，其他各季降水量均呈减少趋势[7]。李栋梁等[8-9]指出西北地区东部尽管气温在升高，但降水量却没有增加，甚至在东部季风边缘区降水量呈减少趋势。

姜大膀等[1]认为自20世纪70年代末以来，全球陆地可利用降水的变化可能是由自然变率主导，与厄尔尼诺-南方涛动现象（ENSO）遥相关紧密联系的。陈冬冬等[10]研究指出西北地区东部受海温影响较大，北大西洋涛动、极涡面积的年际波动均能够反映出西北地区降水西增东减的变化。黄玉霞等[11]研究表明，当西南季风盛行时，甘肃河东东部及河西张掖等地暴雨日数偏多，当东南季风盛行时，甘南高原、甘肃中部等地暴雨日数偏多。许多学者通过对大尺度环流系统的分析也得出了类似结论[12-15]。这些研究多集中分析大尺度环流系统对西北地区

收稿日期：2022-03-28； **修订日期**：2022-05-24
基金项目：甘肃省气象局科研项目（MS2021-09，ZcMs2022-33）；甘肃省科技计划资助项目（20JR5RM626）资助
作者简介：曹彦超（1985-），男，工程师，主要从事中长期气候预测及短时临近天气预报等方面的工作. E-mail: 646891024@qq.com

降水的影响，但综合气温变化对不同地形、不同量级降水的影响比重所进行的研究分析却极少。本文运用经验正交函数分解（Empirical orthogonal function，EOF）、相似分析等方法分析了河东地区夏半年降水的分布及变化特征，并结合环流指数、气温变化及地形特征等对降水影响进行讨论，以期丰富季风区末端降水预测依据。

1 研究区概况

河东指甘肃省中东部地区，是青藏高原与黄土高原的汇集地带（图1）。区域内海拔高度在623~4584 m之间，地形西高东低。西南部的甘南高原位于青藏高原东北边缘，海拔最高4584 m，东侧与岷山甘肃段相邻（甘岷山区），经秦巴山区过渡后海拔迅速下降，至东南部的白龙江流域海拔高度最低达到623 m。气候具有典型的温带大陆性季风特点，降水主要出现在每年的4—9月（夏半年），地势的巨大落差使降水空间差异更加明显，自东南向西北跨越了湿润、半湿润、半干旱以及干旱气候区。为了较细致地分析气候差异，根据西北地区水汽输送特点[16]，以甘岷山区东麓105°E为界，将河东划分为东部地区及西部地区进行分析。

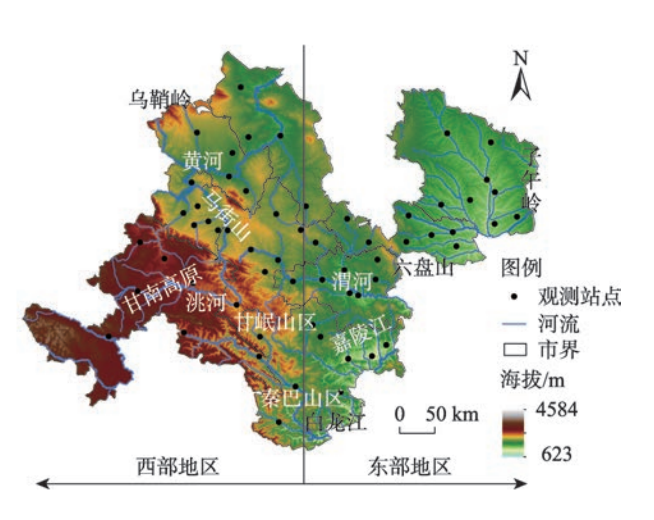


图1 河东地形及气象观测站点分布

Fig. 1 Distribution of topographic and meteorological observation stations in Hedong region

2 数据与方法

采用甘肃省气象信息中心整编筛选的1973—2020年4—9月河东60个国家级地面气象站（图1）的逐日降水及平均气温数据，其中2014年降水资料缺失，不纳入统计。环流指数中海洋尼诺指数（ONI）下载于美国国家海洋和大气管理局网站（https://www.noaa.gov/），北极涛动（AO）及太平洋年代际振荡（PDO）下载于美国国家环境信息中心网站（https://www.ncei.noaa.gov/）。东亚夏季风指数选择Zhao等[17]定义并计算的结果，指数为负表示季风向北发展的强度越强，资料下载于国家青藏高原科学数据中心网站（http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data）。

本文使用EOF分析了河东地区降水时空变化特征，定义第一特征向量场为LV1，第二特征向量场为LV2，第一特征向量场时间系数为PC1，第二特征向量时间系数为PC2。取每年时间系数绝对值较大的特征向量作为当年降水模态，得出两种模态的典型年份；使用相关系数法确定气温及大尺度环流指数与降水量的关联性。定义日降水量0.1~9.9 mm为小雨，10.0~24.9 mm为中雨，25.0~49.9 mm为大雨，≥50.0 mm为暴雨，各量级降水之和为总降水。

3 结果与分析

3.1 降水分布特征

图2为甘肃河东夏半年降水量、降水量占比及降水频率的空间分布。可见河东地区夏半年总降水量自东南向西北减少，西北部景泰站年均降水量169.4 mm，东南部康县达年均降水量642.5 mm，相差3.8倍。其中小雨及中雨自南向北递减，大雨及暴雨自东向西递减。以岷山东麓为界，西部地区小雨及中雨占总降水量的75%以上，尤其是甘南高原及乌鞘岭以北地区占比超过90%。不同的是甘南高原小雨和中雨频率高，降水量也是河东大值中心，中雨以上降水急剧减少，但乌鞘岭以北地区小雨和中雨频率低、降水总量小，中雨以上降水量更少。东部地区小雨及中雨占比在60%~75%之间，其中嘉陵江流域大雨和暴雨发生频率高，中雨及以上量级降水量均为河东大值中心。

3.2 降水量变化趋势

图3为1973—2020年河东各站夏半年降水量的年际变化线性趋势。可见总降水量在东部地区及西部的高原和山区以增长趋势为主，西部其余地区以减少趋势为主。降水量增长趋势的站点共37个，占比61.7%，麦积、玛曲2站增加最显著，为1.5

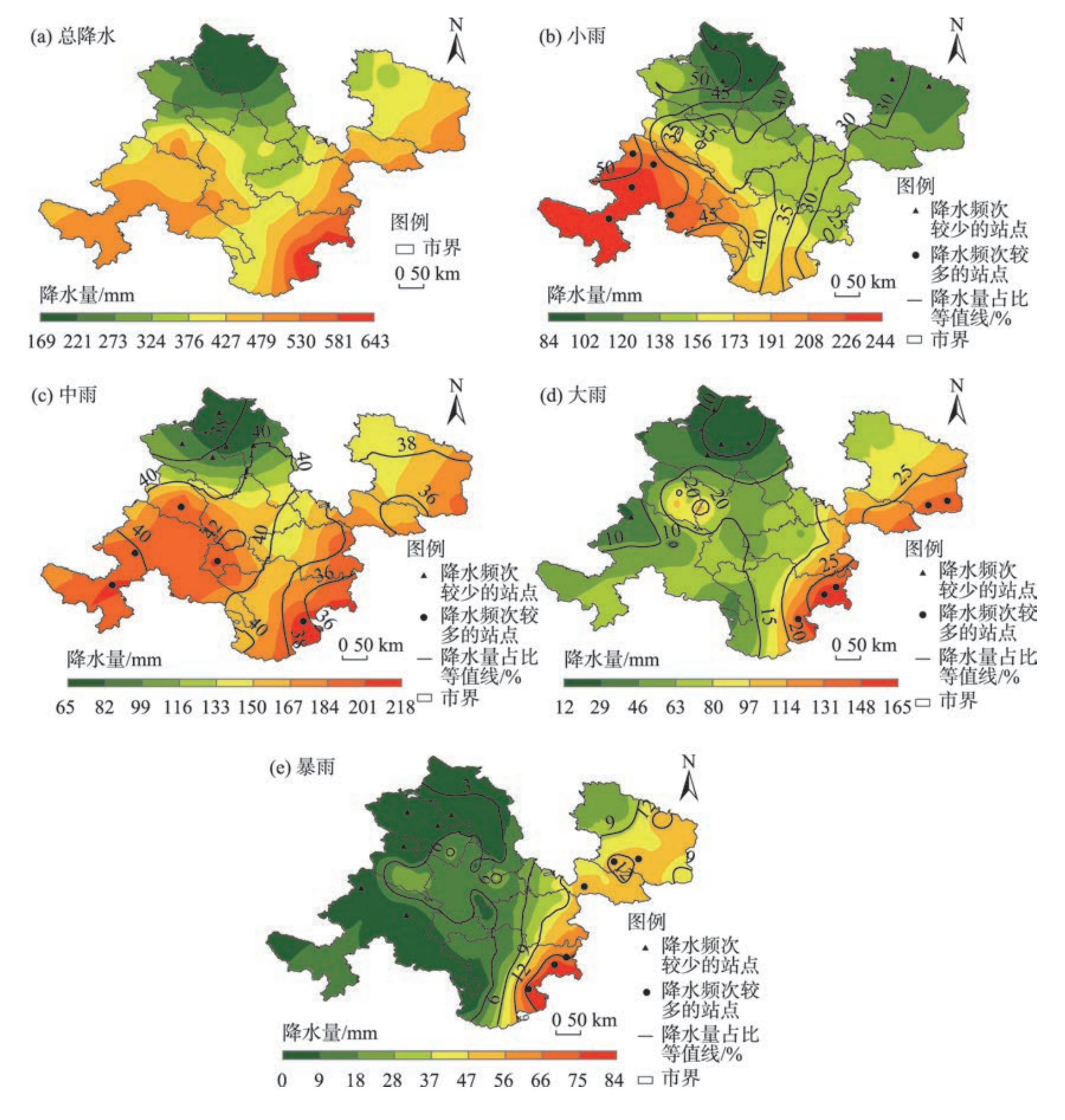


图2　1973—2020年河东夏半年年均降水量空间分布

Fig. 2　Spatial distributions of summer half year precipitation in Hedong region from 1973 to 2020

mm·a^{-1}。减少趋势的站点有23个，占比38.3%，临洮站降速最快为−1.5 mm·a^{-1}。另外，小雨除甘南高原及附近的11个站点（占比11.7%）外，降水量均为减少趋势；中雨有27站（45.0%）为增长趋势，主要位于六盘山以东及乌鞘岭以东地区，甘南高原也有部分站点呈弱增长趋势；大雨及暴雨降水量增长趋势的站点较多，分别为46站（76.7%）和39站（65.0%），东部地区增长最明显，减少趋势的站点主要位于甘南高原至甘岷山区北侧的狭长地带。整体来看，除甘南高原外，河东大部分地区中雨及以下降水以下降趋势为主，大雨及以上降水以上升趋势为主，降水量级总体趋于增大。

3.3　降水变化特征

为了进一步分析降水的变化特征，对近47 a内河东夏半年降水量进行EOF。为便于分析，特征向量场均选择时间系数为上升趋势的模态（图4）。河东暖季总降水及小雨、中雨、大雨、暴雨的第一特征向量方差贡献率分别为52.2%、31.1%、31.5%、25.8%、24.3%，第二特征向量方差贡献率分别为11.8%、9.9%、9.7%、9.2%、15.0%，前2个模态的贡献率均远高于其他模态，因此用前2个模态特征来代表河东降水场的变化。

综合观察总降水量及不同量级降水前2个模态的空间分布，可见LV1大部分区域具有一致的正值

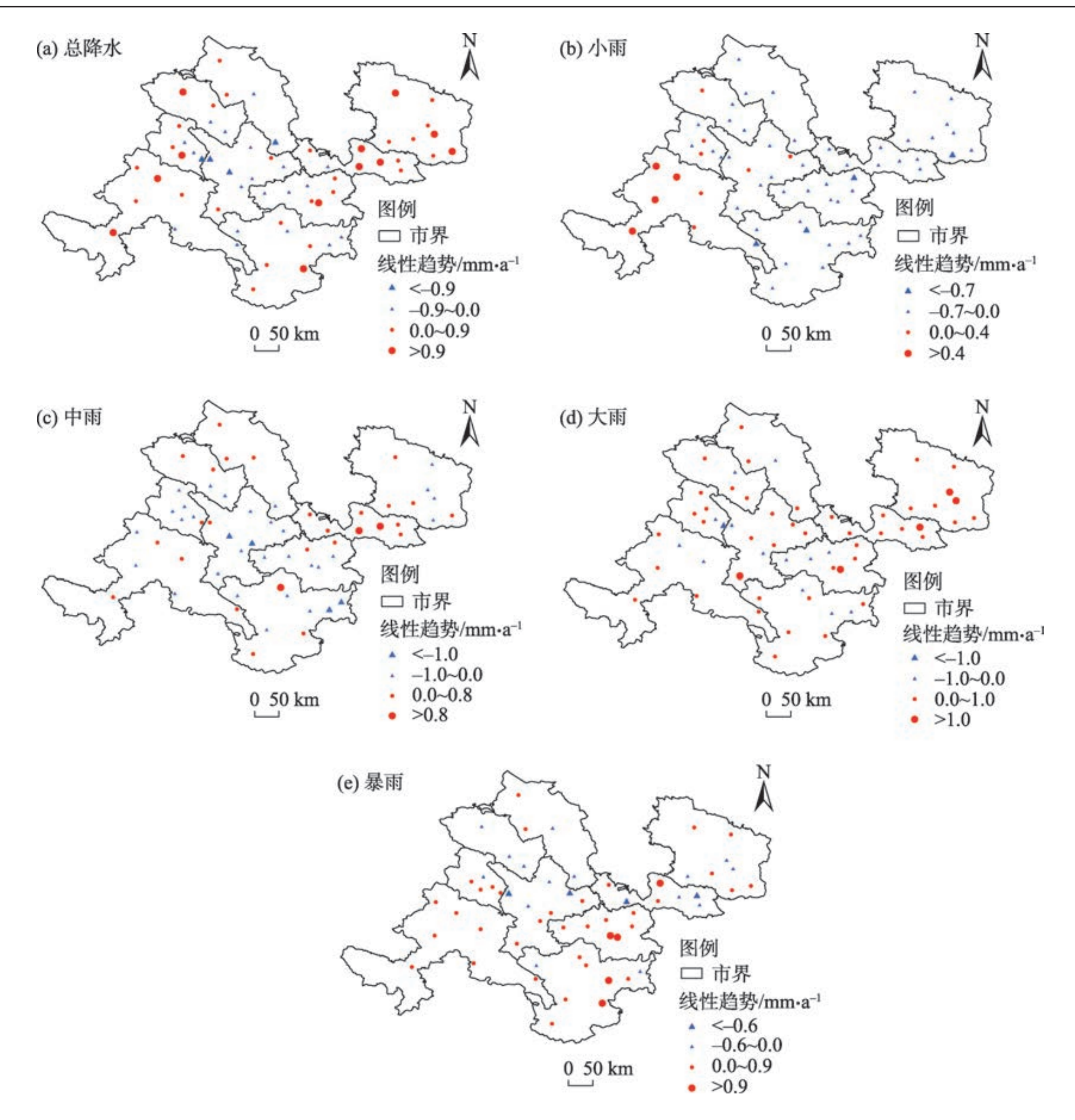
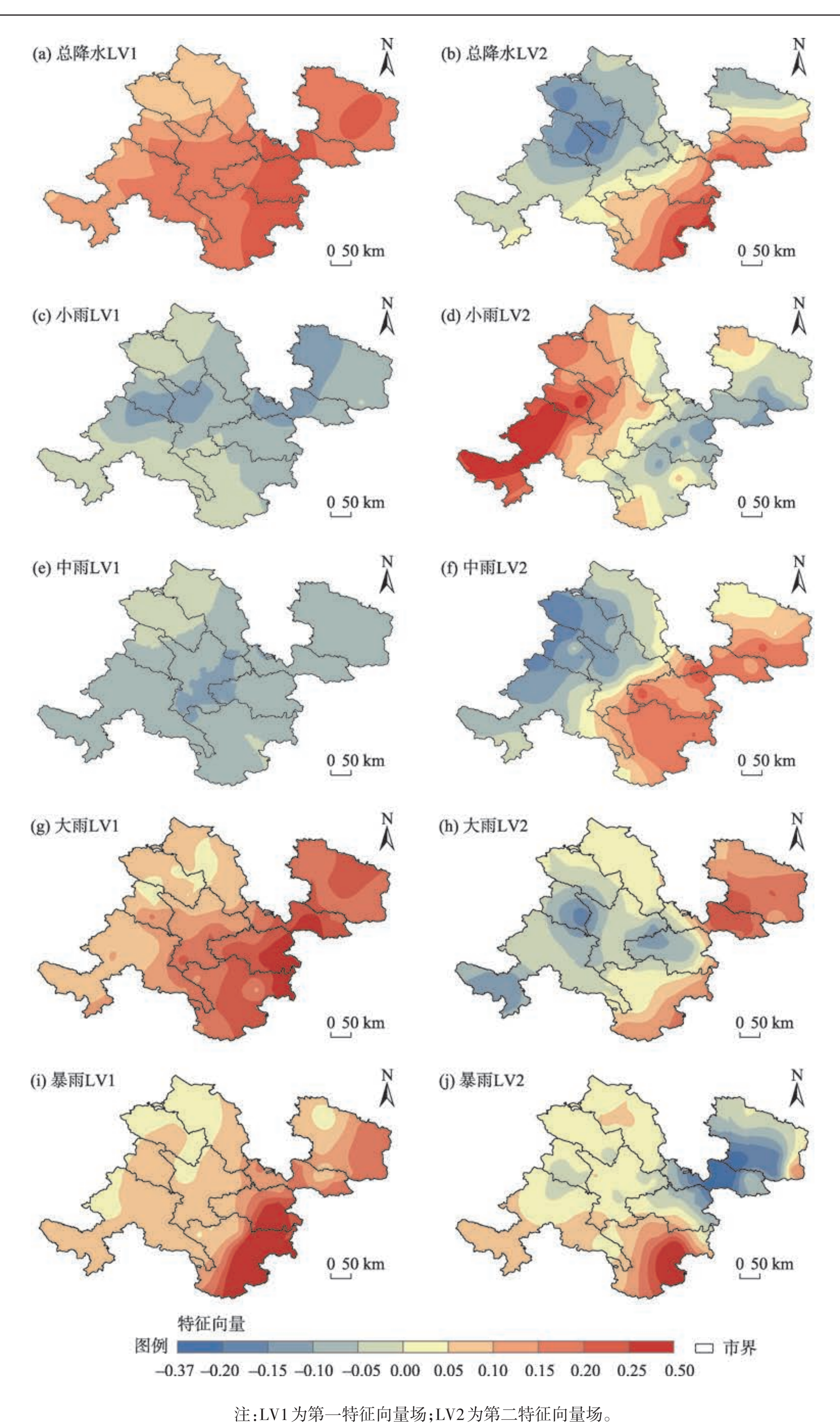


图3 1973—2020年河东夏半年降水量年际变化趋势

Fig. 3 Interannual variation trends of summer half year precipitation in Hedong region from 1973 to 2020

或负值，即河东夏半年降水量年际变化的主要特征是整个区域一致增多或减少；LV2均呈东西部反相变化的分布特征。其中总降水量的LV1为一致正值，空间分布自东向西递减，大值中心位于东部的嘉陵江流域及渭河流域，降水增长最明显。但LV2则表现为自西北部负值向东南部正值逐渐转变，其中乌鞘岭南部至马街山以北出现了小于-0.15的负中心，反映出西部地区部分站点具有降水减少的局部变化趋势。另外，根据不同量级降水量LV1的空间分布，小雨及中雨整体以减少趋势为主，大雨及暴雨以增长趋势为主。而LV2则表现为小雨西部增加东部减少，中雨及大雨西部减少东部增加，暴雨除六盘山以东外均为增长趋势的变化特征，这种变化的正、负值转变地带多位于甘岷山区东麓或北麓附近，可见地形对河东降水造成了显著影响。

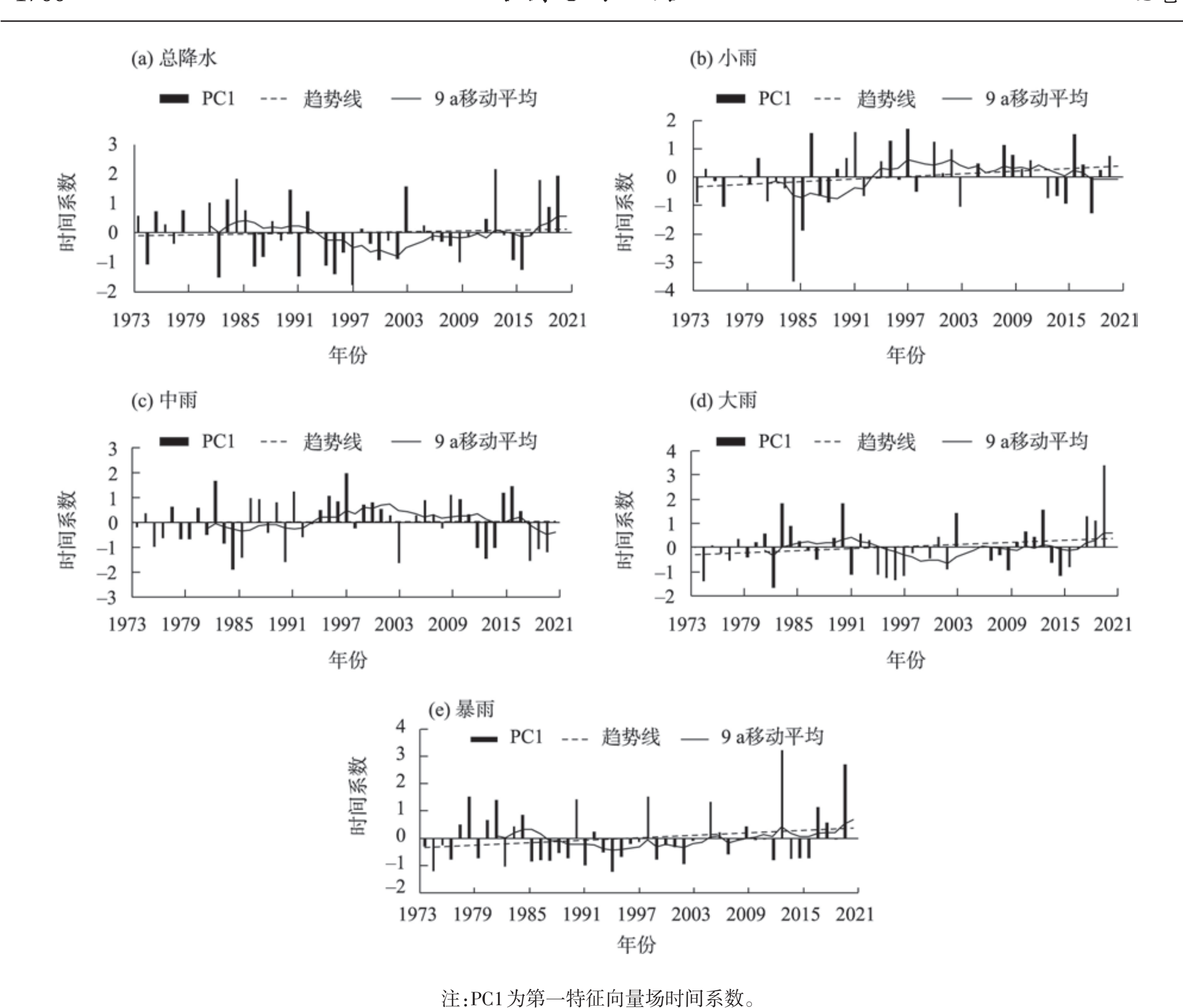
图5、图6分别给出了近47 a河东地区夏半年降水量第一模态及第二模态的时间系数。可见夏半年总降水量PC1的变化大致可以分为3个阶段：1973—1992年以正相位为主，是河东地区的多雨时段；1984年开始PC1移动平均值趋于下降，降水量转为减少趋势，至1993年转为负相位，转为少雨时段，并在1991、1995年和1997年等多个年份超过一个负标准差，干旱尤为明显；2003年开始PC1移动平均值再次转为上升趋势，降水量趋于增多，至2013年河东降水再次转为偏多。48 a中PC1斜率大于零，河东降水量仍然以增长为主要趋势。对比不



注：LV1为第一特征向量场；LV2为第二特征向量场。

图4 河东夏半年降水量经验正交函数分解的第一模态及第二模态空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of the first and second modes of empirical orthogonal function decomposition for summer half year precipitation in Hedong region



注:PC1为第一特征向量场时间系数。

图5 河东夏半年降水量EOF分解的第一特征向量场时间系数

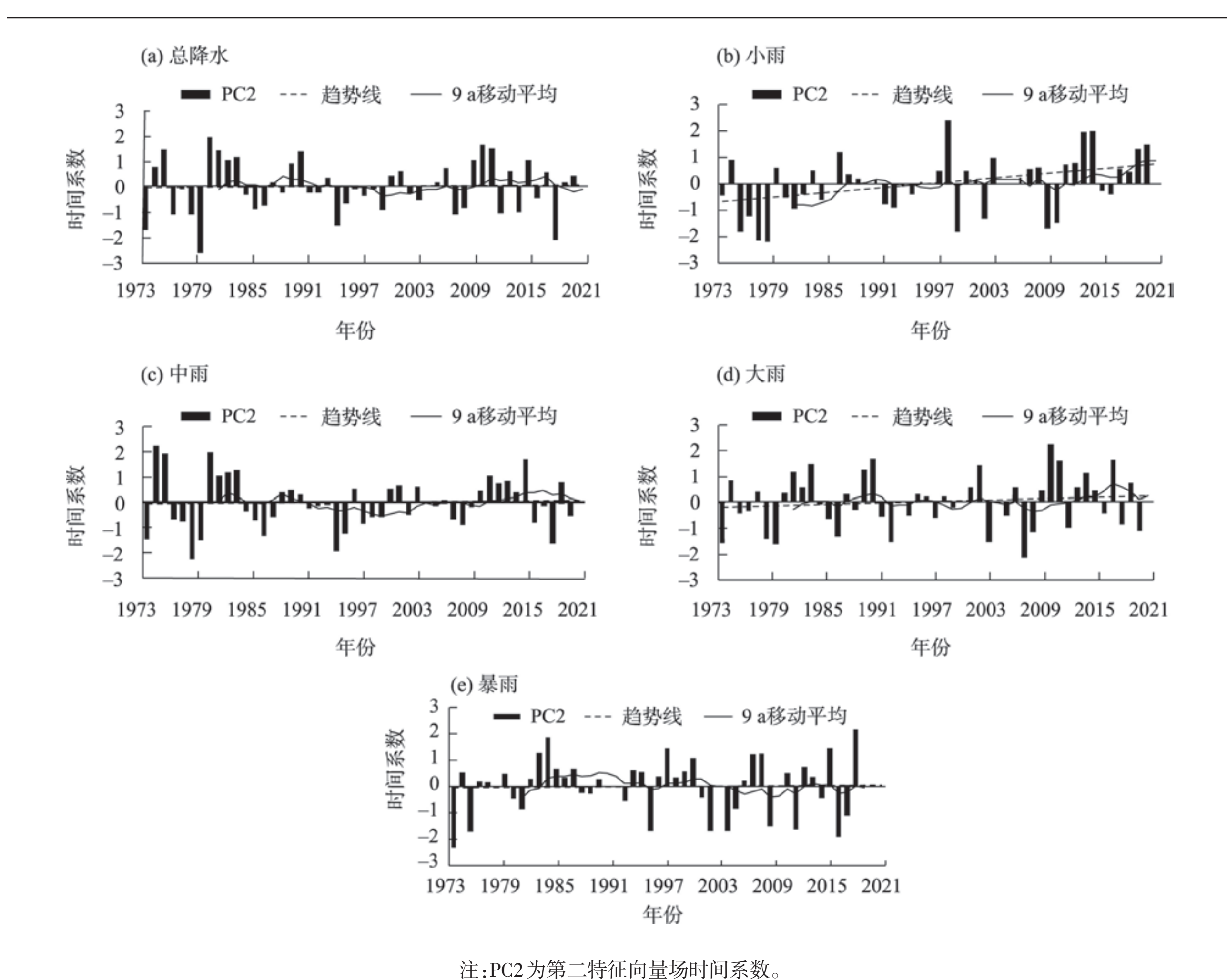
Fig. 5 The first eigenvector field time coefficient of EOF decomposition of summer half year precipitation in Hedong region

同量级降水PC1的变化,相位变化第1个转折点均出现在1993年左右,第2个转折点均出现在2013年左右,虽然小雨和中雨的相位变化与大雨和暴雨相反,但小雨和中雨的LV1以负值为主,可见不同量级降水具有相似的变化周期及相位转变,降水量趋于同时增加或减少。

夏半年总降水量时间系数PC2的年际变化也主要分为3个阶段,1989年移动平均值开始下降,至1994年转为负相位,又于1999年移动平均值开始上升,至2009年转为正相位,正负相位转变的1994年和2009年与第一模态的2个时间转折点较为近似。当LV1处于正相位,全市为多雨年份时,LV2以正相位为主,即在多雨年份,东部地区降水量增加尤为明显,西部地区降水增量较少,甚至部分站点降水量有所减少。相反,当LV1为负相位,LV2也多为负相位,在少雨年份,东部地区降水量减少尤为明显,西部地区降水减少量较小,局地降水量有增加趋势。对比不同量级降水时间系数的年际变化,可见中雨及大雨分别在1990年及2010年出现转折,变化周期基本与夏半年总降水量吻合,降水变化方向也相同,说明中雨及大雨对夏半年总降水量的局地变化影响最大。小雨为波动上升趋势,2011年后PC2上升尤为明显。暴雨的时间分布相对独立,2000年以来多数年份PC2正负值超过一个标准差,年际变化非常明显。

3.4 影响因素分析

根据(IPCC)第六次评估报告结果,对降水变化产生影响的气候因素主要包括气候变暖造成的极端湿润和极端干旱事件的加剧,以及大气环流模态的变化对极端事件发生影响。本文主要针对这两



注:PC2为第二特征向量场时间系数。

图6　河东夏半年降水量EOF分解的第二特征向量场时间系数

Fig. 6　The second eigenvector field time coefficient of EOF decomposition of summer half year precipitation in Hedong region

方面内容进行分析。

3.4.1　气温　图7是河东夏半年总降水及各量级降水的降水量分别与夏半年平均气温相关系数的空间分布。可见除甘南高原外,夏半年总降水及暴雨以下降水降水量普遍与平均气温负相关,其中小雨与气温的相关性最好,41.7%的站点相关系数超过-0.3,这些站点多位于河东北部。总降水及中雨、大雨与气温的相关性较弱,多在-0.2~-0.3之间,相关性较好的站点多位于东部的秦巴山区、渭河流域及子午岭林区,甘南高原及其以北山区与气温正相关,可见不同区域气温与降水的关系明显不同。气温上升虽然增加了地表水蒸发,提升了大气中水汽含量,有利于上升气流的发展,促进降水增多[18-19],但相反的,系统性降水多伴随冷空气南下,云层也会遮挡地面辐射,使气温下降。河东地区以半湿润、半干旱及干旱气候特征为主,地表水系少,多数地区升温促进当地水循环对降水的影响极为有限,水汽主要来源仍为偏南暖湿气流输送,冷空气活动对降水频率影响的比重明显较大,因此多数区域降水量与气温负相关。其中河东地区小雨整体与气温负相关,但随着降水量级的增大,相关性整体向正值方向平移,原因是伴随降水强度的增大,对与气温紧密关联的大气不稳定度要求就越高。河东西部地区处于东亚季风区最末端,受甘南高原及甘岷山区阻挡,输入性水汽明显弱于东部地区,气温变化对降水影响的比重更大。其中甘南高原及其以北山区海拔高度高,近40 a来气温上升速度明显快于周边其他地区[20],且境内有尕海湖、白龙江、黄河、洮河、大夏河等水系,水资源丰富,气候变暖对当地水体循环的促进作用比重增加,中雨及以上降水均与气温正相关,总降水量趋于增加。西部其他地区地表水系较少,对输入性水汽的依赖较大,并且降水以小雨及中雨为主,气温上升影响小量级降水量减少,进一步影响总降水量的减少和干

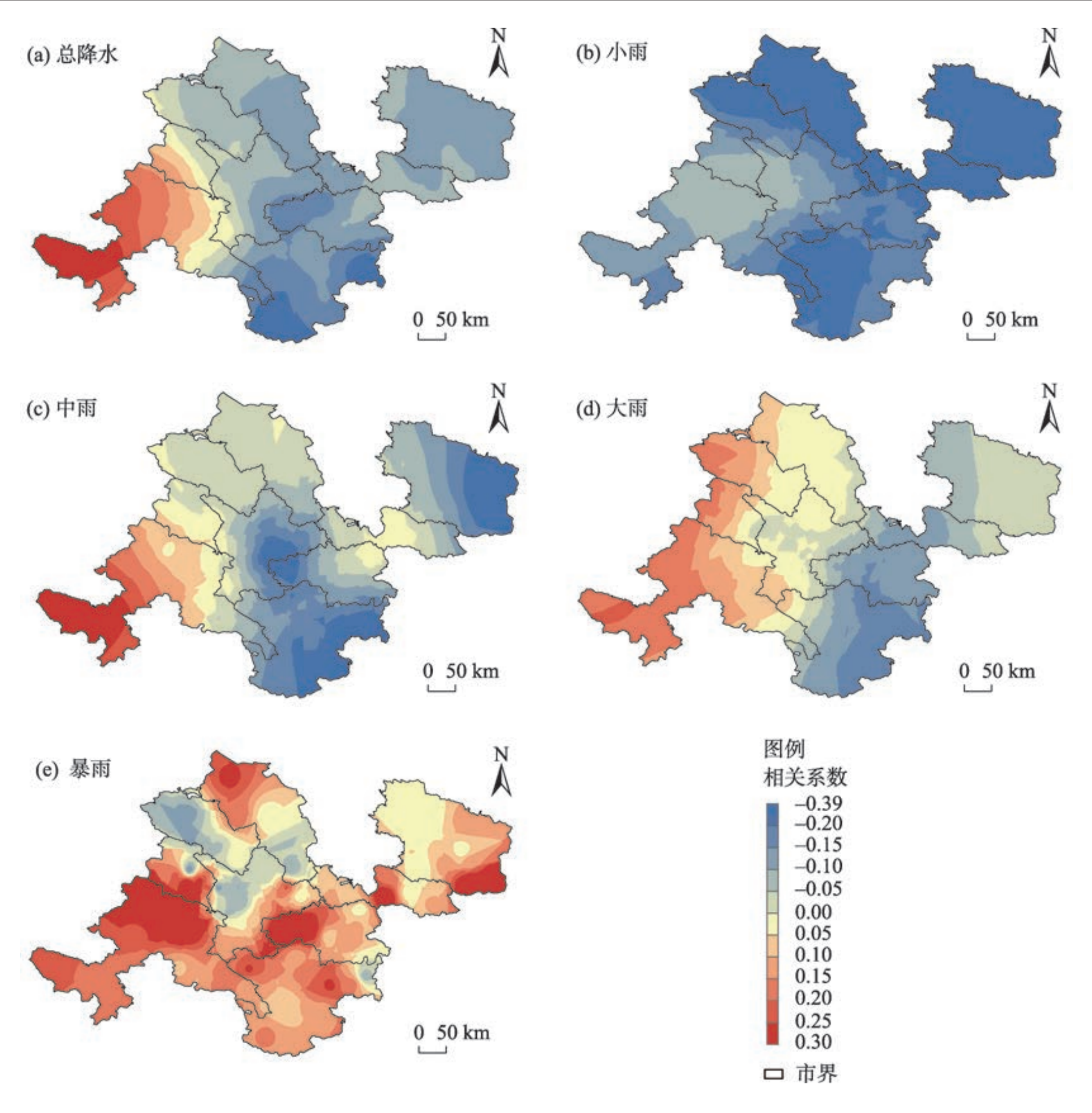


图7 1973—2020年河东夏半年降水量与平均气温的相关系数空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of correlation coefficient between precipitation and average temperature in summer half year in Hedong region from 1973 to 2020

旱的加剧。

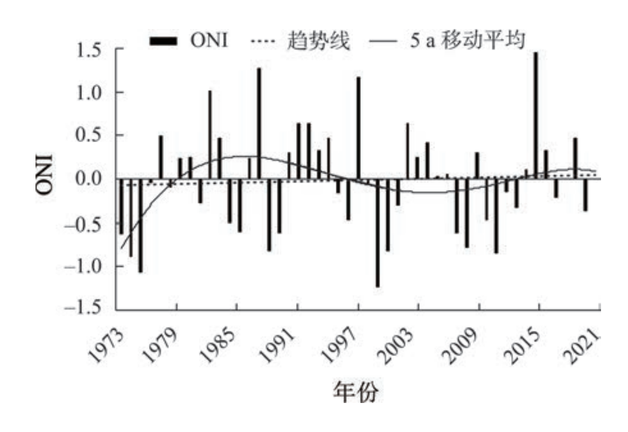
3.4.2 大气环流 对比两种模态的时间系数，获得第一模态典型年份29 a，第二模态典型年份18 a。为了讨论ENSO事件及AO等大尺度环流系统对河东降水的影响，分别对两种模态典型年份的时间系数及夏半年总降水、各量级降水的降水量与ONI、PDO、季风指数及AO做相关性分析(表1)。第一模态典型年份，ONI与PC1及各降水要素均负相关，其中与PC1、总降水及中雨降水量显著负相关。可见Niño 3.4区(5°N~5°S、120°~170°W)海温偏低时，河东降水偏多，对中雨及以上量级降水影响尤为明显。第二模态典型年份，ONI除大雨外与其他量级降水的降水量相关性均较差，但ONI平均值为−0.34，明显低于第一模态下的0.14，拉尼娜事件影响年占比也比第一模态偏多20.6%。ENSO事件主要通过影响副高位置及夏季风强度来影响我国降水[21−22]，1998年ONI发生突变，西太平洋海温由正相位转为负相位(图8)，1973—1998年拉尼娜事件影响年占比为44%，1998—2020年上升为73.9%，我国雨带北抬，河东降水增多，这与EOF夏半年总降水量LV2的移动平均值在1999年转为上升趋势相吻合。东亚夏季风指数的相关性与ONI相似，但相关性弱于ONI。夏季风在向北延伸过程中受到甘南高原及甘岷山区阻挡，更倾向于沿着甘岷山区以东地形相对平缓的区域前进，因此对东部地区影响最明显，降水量增长也最快。而西部地区位于季风区

表1　1973—2020年河东前2类降水模态的时间系数及降水量与环流指数的相关性

Tab. 1　Time coefficients of the first two precipitation modes in Hedong region from 1973 to 2020 and the correlation between precipitation and circulation index

模态	环流指数	时间系数	总降水	小雨	中雨	大雨	暴雨
PC1	ONI	−0.35*	−0.35*	−0.18	−0.43*	−0.24	−0.26
	季风指数	−0.18	−0.19	0.05	−0.23	−0.17	−0.24
	PDO	−0.08	−0.04	0.14	−0.10	0.06	−0.25
	AO	−0.29*	−0.29*	−0.13	−0.37*	−0.21	−0.16
PC2	ONI	−0.22	−0.13	0.06	0.10	−0.41*	−0.22
	季风指数	0.22	−0.14	−0.28*	−0.25	0.21	0.08
	PDO	0.18	−0.09	−0.06	−0.22	−0.29*	0.36*
	AO	−0.26*	−0.14	−0.06	0.34*	−0.53*	−0.43*

注：PC1、PC2分别为EOF分解的第一及第二特征向量场的时间系数；ONI为海洋尼诺指数；PDO为太平洋年代际振荡；AO为北极涛动。*表示相关性经过0.05显著水平检验。



注：ONI为海洋尼诺指数。

图8　1973—2020年海洋尼诺指数年际变化

Fig. 8　Interannual variation of ONI from 1973 to 2020

末端，且受到多处山脉阻挡，季风影响较弱，除乌鞘岭及甘岷山区东侧迎风坡降水量有所增加外，多数站点为减少趋势。

PDO的年代际震荡与副高的西进和东退明显相关，当处于正相位时更有利于副高东退[23]。第一模态PDO与各项要素的相关性并不显著，第二模态时间系数与PDO正相关。当PDO为负相位时，副高西进，有利夏季风向西北内陆地区深入，西部地区降水增多；PDO为正相位时，副高东退，夏季风沿着甘岷山区以东向北伸展，东部地区降水增多，西部降水减少。大雨降水量与PDO显著负相关，暴雨降水量与PDO显著正相关，小雨受PDO影响较小。

第一模态典型年份，AO与时间系数及总降水、中雨降水量显著负相关，当其处于负相位时，北极冷气团更容易向南渗透，影响河东降水偏多，对中雨影响尤为明显。第二模态典型年份，AO与时间系数负相关，可见当南下冷空气强盛时，冷空气前沿可以影响到河东东南部，使东南地区降水增多。其中AO与中雨降水量显著正相关，与大雨和暴雨降水量显著负相关，原因是西部地区处于季风区末端，中雨降水量与气温负相关，冷空气较弱时更有利于暖湿气流向内陆深入，使河东西部地区更加湿润，增加了中雨的发生频率及面积。但西部地区大雨及暴雨出现频率低，只有冷空气相对强盛，影响到东南部水汽、能量更充足的地区时，暴雨及大雨范围才会增加。

4　结 论

（1）甘肃河东小雨降水量与气温负相关，随着降水量级增大相关性整体向正值方向平移。河东西部位于季风区最末端，夏半年小雨及中雨降水量占比在75%以上，气温变化对降水影响被凸显。其中甘南高原及以北山区由于海拔高度高，地形阻滞使输入性水汽减少，但当地水资源丰富，气候变暖速度明显快于其他区域，气候变暖对当地水循环的促进作用使降水区域增多。西部其他区域偏南气流伴随的输入性水汽仍占主导地位，气候变暖及冷空气活动减弱使范围内降水趋于减少。

（2）河东东部地形过渡平缓，降水受东亚季风影响显著。1998年Niño 3.4区西太平洋海温由正相位为主转为负相位为主，随着季风增强及雨带北抬，偏南气流更倾向于沿着甘南高原及甘岷山区地

以东向北延伸，影响东部地区降水趋于增多，且有向大量级发展的趋势。

（3）河东夏半年降水量年际变化的主要特征是总降水及各量级降水在整个区域内一致增多或减少；拉尼娜年河东地区更容易出现东、西部降水偏差相反的局地变化特征。由于河东同属东亚季风影响区，降水整体变化规律基本一致；但由于拉尼娜年西太平洋副热带高压位置偏北，季风强度的改变使岷山东西两侧降水变化的差异被凸显。当PDO处于负相位时，副高位置偏西，西部地区降水增多，中雨及以上量级降水增长最明显，东部部分站点降水减少。AO为负相位时，冷空气活动活跃，东南部降水量增多最明显，西部部分站点降水减少。

地理地形的显著差异使河东不同地区温度变化与环流系统调整对降水影响的比重明显不同，出现了夏半年降水量整体以增长趋势为主，部分区域呈减少趋势的特点。本文对上述问题做了简单的定性分析，但定量分析仍有待进一步研究。

参考文献（References）

[1] 姜大膀, 王娜. IPCC AR6报告解读: 水循环变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 699-704. [Jiang Dabang, Wang Na. Water cycle changes: Interpretation of IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 699-704.]

[2] 卢爱刚. 半个世纪以来黄土高原降水的时空变化[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 957-959. [Lu Aigang. Spatial and temporal precipitation variation on the Loess Plateau in the past half century [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 957-959.]

[3] 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 我国西北地区近50年降水和温度的变化[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 9-18. [Yu Shuqiu, Lin Xuechun, Xu Xiangde. The climatic change in northwest China in recent 50 years[J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8 (1): 9-18.]

[4] 王澄海, 张晟宁, 李课臣, 等. 1961—2018年西北地区降水的变化特征[J]. 大气科学, 2021, 45(4): 713-724. [Wang Chenghai, Zhang Shengning, Li Kechen, et al. Change characteristics of precipitation in northwest China from 1961 to 2018[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(4): 713-724.]

[5] 陈冬冬, 戴永久. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 923-935. [Chen Dongdong, Dai Yongjiu. Characteristics of northwest China rainfall intensity in recent 50 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(5): 923-935.]

[6] 郭嘉兵, 李金文, 马金珠, 等. 甘肃省1961—2018年降水量时空分布与变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 142-148. [Guo Jiabing, Li Jinwen, Ma Jinzhu, et al. Spatiotemporal variation in precipitation over Gansu Province from 1961 to 2018[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 142-148.]

[7] 赵一飞, 邹欣庆, 张勃, 等. 黄土高原甘肃区降水变化与气候指数关系[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1325-1332. [Zhao Yifei, Zou Xinqing, Zhang Bo, et al. Precipitation variation in association with climate indices in Loess Plateau of Gansu Province, northwest China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(10): 1325-1332.]

[8] 李栋梁, 魏丽, 蔡英, 等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 135-142. [Li Dongliang, Wei Li, Cai Ying, et al. The present facts and the future tendency of the climate change in northwest China[J]. Journal of Glaclology and Geocryology, 2003, 25(2): 135-142.]

[9] 宋连春, 张存杰. 20世纪西北地区降水量变化特征[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 143-148. [Song Lianchun, Zhang Cunjie. Changing features of precipitation over nothwest China during the 20th century[J]. Journal of Glaclology and Geocryology, 2003, 25(2): 143-148.]

[10] 陈冬冬, 戴永久. 近五十年中国西北地区夏季降水场变化特征及影响因素分析[J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1247-1258. [Chen Dongdong, Dai Yongjiu. Characteristics and analysis of typical anomalous summer rainfall patterns in northwest China over the last 50 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(6): 1247-1258.]

[11] 黄玉霞, 王宝鉴, 王研峰, 等. 东亚夏季风的变化特征及其对甘肃夏季暴雨日数的影响[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 140-147. [Huang Yuxia, Wang Baojian, Wang Yanfeng, et al. Variation of East Asian summer monsoon and its influences on summer rainstorm days in Gansu, China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 140-147.]

[12] 刘新伟, 王澄海, 郭润霞, 等. 1981—2018年甘肃省极端暴雨天气过程的气候与环流特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(5): 750-758. [Liu Xinwei, Wang Chenghai, Guo Runxia, et al. Climate and circulation characteristics of extreme rainstorm processes in Gansu from 1981 to 2018[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(5): 750-758.]

[13] 管晓丹, 马洁茹, 黄建平, 等. 海洋对干旱半干旱区气候变化的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(6): 895-912. [Guan Xiaodan, Ma Jieru, Huang Jianping, et al. Influence of ocean on climate change in arid and semi-arid areas[J]. Scientia Sinica Terrae, 2019, 49(6): 895-912.]

[14] 胡梦玲, 游庆龙. 青藏高原南侧经圈环流变化特征及其对降水影响分析[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 14-28. [Hu Mengling, You Qinglong. Characteristics of meridional circulation cell on the south side of Qinghai-Tibetan Plateau and its effects on precipitation over the region[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(1): 14-28.]

[15] 冯晓莉, 申红艳, 李万志, 等. 1961—2017年青藏高原暖湿季节极端降水时空变化特征[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 694-705.

[Feng Xiaoli, Shen Hongyan, Li Wanzhi, et al. Spatiotemporal changes for extreme precipitation in wet season over the Qinghai-Tibetan Plateau and the surroundings during 1961—2017[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 694-705.]

[16] 赵光平, 姜兵, 王勇, 等. 西北地区东部夏季水汽输送特征及其与降水的关系[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 239-247. [Zhao Guangping, Jiang Bing, Wang Yong, et al. Characteristics of summer water vapor transport in the eastern northwest China and their relationships with precipitation[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 239-247.]

[17] Zhao G J, Huang G, Wu R G, et al. A new upper-level circulation index for the East Asian summer monsoon variability[J]. Journal of Climate, 2015, 28(24): 9977-9996.

[18] 艳艳. 强降水对相关气象要素的依赖性研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019. [Yan Yan. Study on the dependence of heavy precipitation on relevant meteorological elements[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2019.]

[19] 梁宏. 青藏高原大气水汽变化和对辐射影响的模拟[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012. [Liang Hong. Simulation of atmospheric water vapor variation and its influence on radiation over the Qinghai Tibet Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2012.]

[20] 赵一飞, 张勃, 汪宝龙, 等. 近54 a来甘肃省河东地区气候时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 956-964. [Zhao Yifei, Zhang Bo, Wang Baolong, et al. Spatiotemporal climate change in the Hedong region in Gansu Province in recent 54 years[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 956-964.]

[21] 王素艳, 纳丽, 王璠, 等. 海冰和海温对西北地区中部6月降水异常的协同影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 63-72. [Wang Suyan, Na Li, Wang Fan, et al. Synergistic effects of ice and sea surface temperature on the precipitation abnormal in June in the central part of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 63-72.]

[22] 段欣妤, 薛峰, 郑飞. El Niño衰减年夏季西太平洋副热带高压的季节内变化[J]. 大气科学, 2020, 44(6): 1364-1376. [Duan Xinyu, Xue Feng, Zheng Fei. Intraseasonal variation of the Western Pacific subtropical high during the El Niño decaying summers[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(6): 1364-1376.]

[23] Qi T, Huang Y Y, Duan M K, et al. Possible contribution of the PDO to the eastward retreat of the Western Pacific subtropical high[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2021, 14(1): 29-34.

Variation characteristics and influencing factors of summer half-year precipitation in Hedong region of Gansu Province from 1973 to 2020

CAO Yanchao, JIAO Meiling, QIN Tuo, GUO Tong
(Qingyang Meteorological Bureau, Qingyang 745000, Gansu, China)

Abstract: The Hedong region of Gansu Province, China, is located in the convergence zone of the Qinghai-Tibet Plateau and Loess Plateau. The terrain is complex and diverse, and the altitude drop is up to 3961 m. The precipitation climate difference is obvious, and several studies have shown that the precipitation in this region exhibits different trends in recent years. This project is based on the precipitation data of 60 national meteorological stations in the Hedong region from April to September between 1973 and 2020. The temporal and spatial distributions and variation characteristics of total precipitation and precipitation of different magnitudes are analyzed using an empirical orthogonal function method, and the influence of temperature, large-scale circulation, topography, and other factors on summer half-year precipitation in different regions are investigated using a correlation analysis method. The results are as follows: (1) The western part of the Hedong region is located at the end of the East Asian monsoon region. Light rain and moderate rain account for the largest proportion of the total precipitation, and temperature changes have a significant impact on precipitation. The altitude of the Gannan Plateau and the northern mountain area is high, and the input water vapor is less. The promotion of climate warming on the local water cycle makes the precipitation tend to increase. The imported water vapor remains dominant in other regions in the western part, and the weakening of cold air activity makes the precipitation tend to decrease. (2) The eastern part of the Hedong region has a gentle terrain transition, and the precipitation is significantly affected by the East Asian monsoon. After 1998, the sea surface temperature in the Niño 3.4 area was primarily a negative anomaly. With the strengthening of the monsoon and the northward uplift of the Chinese rain belt, the precipitation in the eastern region increased. (3) The main feature of interannual variation in precipitation in the Hedong region is that all stations increase or decrease simultaneously, but an inverse variation in precipitation in the eastern and western regions easily occurs in a La Niña year. In the negative phase of PDO, the precipitation in the western region increases significantly and decreases in some stations in the eastern part. In the negative phase of AO, the precipitation in the southeast increases significantly and decreases in some stations in the western part. Different from the traditional research on precipitation climate change, this study focuses on the comparative analysis of the specific impact of temperature and large-scale circulation systems on the precipitation change in the summer half-year under different topographic characteristics at the end of the East Asian monsoon region, which will provide a new idea for predicting precipitation climate change in the monsoon region and is of great significance for coping with climate change and promoting disaster prevention and reduction.

Key words: summer half-year precipitation; the temporal and spatial variation characteristics; temperature; circulation index; Hedong region of Gansu Province